

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Sedak-Benčić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mirko Jakopčić, dipl. ing.

Student:

Ivan Sedak-Benčić

Zagreb, 2013

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svom mentoru doc. dr. sc. Mirku Jakopčiću koji mi je ustupio svu potrebnu literaturu za izradu rada, te mi omogućio izradu meni veoma zanimljive teme.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu, doc. dr. sc. Suzani Jakovljević, prof. dr. sc. Lidiji Ćurković, te laborantu Ivanu Vovku koji su mi pomogli oko analize uzoraka.

Ivan Sedak-Benčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **IVAN SEDAK-BENČIĆ** Mat. br.: 0035171107

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ PREGRIJAVANJA CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA NA STANJE MATERIJALA CIJEVI**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF ARTILLERY WEAPON BARREL SUPERHEAT ON BARREL MATERIAL CONDITION**

Opis zadatka:

Prilikom opaljenja topničkog oružja dolazi do naglog izgaranja barutnog punjenja u cijevi i stvaranja velike količine vrućih barutnih plinova. Visoki tlak ovih plinova stvara potisnu silu na dno projektila, pod čijim se djelovanjem projektil kreće prema ustima cijevi. Pri izlasku iz cijevi projektil mora postići potrebnu brzinu i aerodinamičku stabilnost.

Vrući barutni plinovi i trenje centrirajućeg i vodećeg prstena projektila uzduž profila kanala cijevi, izazivaju naglo zagrijavanje materijala cijevi, naročito površinskih slojeva kanala cijevi. U slučaju odstupanja od propisanog režima paljbe, ova zagrijanost može doseći nekoliko stotina, pa i prijeći tisuću °C. Ovakvo nekontrolirano zagrijavanje i hlađenje cijevi izaziva promjene metalografske strukture materijala, promjenu njegovih mehaničkih značajki, kao i promjenu otpornosti na trošenje.

U ovom radu je potrebno:

1. Prikazati namjenu, osnovne konstrukcijske značajke i materijal cijevi klasičnih topničkih oružja,
2. Prikazati značajke procesa opaljenja,
3. Provesti kemijsku analizu uzorka materijala cijevi odabranog topničkog oružja,
4. Ispitne uzorke izrezane iz cijevi oružja zagrijavati na temperature od 600°C do 900°C i hladiti na zraku,
5. Provesti metalografsko snimanje zagrijavanih i nezagrijavanih uzoraka, te izmjeriti tvrdoću po poprečnom presjeku uzoraka.
6. Analizirati rezultate i dati zaključak.

Zadatak zadan:
16. studenog 2012.

Rok predaje rada:
1. rok: 15. veljače 2013.
2. rok: 11. srpnja 2013.
3. rok: 13. rujna 2013.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 27., 28. veljače i 1. ožujka 2013.
2. rok: 15., 16. i 17. srpnja 2013.
3. rok: 18., 19., i 20. rujna 2013.

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Doc. dr. sc. Mirko Jakopčić

Prof. dr. sc. Zoran Kunica

Sadržaj

POPIS SLIKA	5
POPIS TABLICA.....	7
POPIS OZNAKA	8
SAŽETAK.....	10
1. UVOD	11
2. NAMJENA, KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE I MATERIJAL CIJEVI	
KLASIČNOG TOPNIČKOG ORUŽJA.....	12
2.1. NAMJENA CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA	12
2.1.1. GLAVNI DIJELOVI CIJEVI.....	13
2.2. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE CIJEVI	16
2.3. MATERIJAL CIJEVI.....	18
2.3.1. LEGIRNI ELEMENTI ČELIKA ZA IZRADU TOPNIČKIH CIJEVI	20
3. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA TOPNIČKOG ORUŽJA	21
3.1. TOPNIČKI NABOJ	21
3.2. VRSTE BARUTA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE	22
3.3. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA.....	24
4. KEMIJSKA ANALIZA UZORKA CIJEVI.....	29
5. PRIPREMA UZORAKA ZA METALOGRAFSKO SNIMANJE	32
6. ANALIZA MIKROSTRUKTURE	34
7. ZAKLJUČAK	40
LITERATURA.....	41

POPIS SLIKA

Slika 1. Putanje i dometi topničkih oružja [2]

Slika 2. Glavni dijelovi topa 76 mm [3]

Slika 3. Glavni dijelovi cijevi [4]

Slika 4. Poprečni presjek cijevi [4]

Slika 5. Žlijeb cijevi razvijen u x-y ravnini [4]

Slika 6. Podjela topničkih cijevi prema konstrukcijskom rješenju [4]

Slika 7. Raspodjela tlaka p i naprezanja σ na presjeku samoojačane cijevi nakon rasterećenja [4]

Slika 8. Konstrukcijska rješenja cijevi topničkih oružja [4]

Slika 9. Toplinska obrada čelika za topničku cijev [4]

Slika 10. Topnički naboj [5]

Slika 11. Projektil topničkog oružja [6]

Slika 12. Sustav cijev-projektil-barutno punjenje-zatvarač [4]

Slika 13. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o prijađenom putu x projektila [4]

Slika 14. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o vremenu kretanja projektila t [4]

Slika 15. Skening elektronski mikroskop tipa TESCAN VEGA [7]

Slika 16. Kvalitativna kemijska analiza uzorka dobivena pomoću SEM-a [8]

Slika 17. Područje ispitivnja na površini uzorka

Slika 18. Spektrometar GDS 850 A proizvođača Leco [9]

Slika 22. Snimka uzorka zagrijavanog na 600°C, te hlađenog na zraku

Slika 19. Svjetlosni mikroskop tipa OLYMPUS BH-2

Slika 20. Ispitni uzorci zaliveni u polimernu masu

Slika 21. Metalografska snimka nezagrijavanog uzorka

Slika 22. Snimka uzorka zagrijavanog na 600°C, te hlađenog na zraku

Slika 23. Snimka uzorka zagrijavanog na 700°C, te hlađenog na zraku

Slika 24. Snimka uzorka zagrijavanog na 800°C, te hlađenog na zraku

Slika 25. Snimka uzorka zagrijavanog na 900°C, te hlađenog na zraku

Slika 26. Snimka uzorka zagrijavanog na 1000°C, te hlađenog na zraku

POPIS TABLICA

Tablica 1. Fizičko-kemijske i balističke karakteristike baruta

Tablica 2. Rezultati kvantitativne kemijske analize uzorka

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Naziv
a	mm	širina polja
b	mm	širina žlijeba
d	mm	kalibar cijevi
d_0	mm	promjer cijevi između dva nasuprotna žlijeba
F	N	sila
h	mm	dubina žlijeba
l	mm	apsolutna duljina koraka žlijeba
l_u	mm	duljina vodećeg dijela cijevi
P	N/mm ²	tlak
p_b	N/mm ²	tlak pripaljivanja baruta
p_k	N/mm ²	tlak barutnih plinova po završetku izgaranja barutnog punjenja
p_m	N/mm ²	najveći tlak barutnih plinova
p_{ut}	N/mm ²	tlak utiskivanja projektila
R_e	N/mm ²	granica elastičnosti
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
t	s	vrijeme
t_k	s	vrijeme kretanja projektila do završetka izgaranja barutnog punjenja
t_m	s	vrijeme kretanja projektila do postizanja tlaka p_m
t_u	s	vrijeme kretanja projektila do izlaska iz usta cijevi

t_3	s	vrijeme kretanja projektila do postizanja brzine v_{\max}
U	J	unutarnja energija barutnih plinova
V	m/s	brzina
v_k	m/s	brzina projektila u trenutku t_k
v_m	m/s	brzina projektila u trenutku t_m
v_0	m/s	početna brzina projektila
v_{\max}	m/s	najveća brzina projektila
X	mm	prijeđeni put
x_k	mm	put projektila do završetka izgaranja barutnog punjenja
x_m	mm	put projektila do trenutka postizanja tlaka p_m
x_u	mm	put projektila do izlaska iz usta cijevi
x_3	mm	put projektila do postizanja brzine v_{\max}
α	°	kut uvijanja žlijebova
ε		relativna duljina koraka žlijeba
σ	N/mm ²	normalno naprezanje
η		stupanj korisnog djelovanja
T	K	temperatura

SAŽETAK

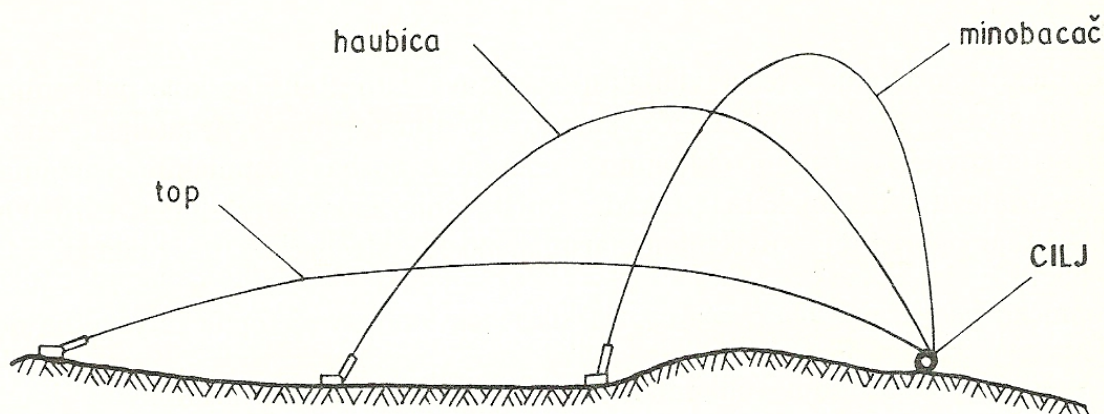
Za pravilno konstruiranje topovske cijevi potrebno je poznavati sve mehaničke i toplinske procese koji u cijevi nastaju od početka izgaranja barutnog punjenja pa sve do izlaska projektila iz cijevi. Prilikom procesa opaljenja dolazi do vrlo brzog izgaranja barutnog punjenja, te stvaranja velike količine vrućih barutnih plinova. Tlak plinova mora biti dovoljno velik da ostvari silu potrebnu za kretanje projektila kroz cijev, te da osigura potrebnu brzinu projektila na ustima cijevi. Uslijed djelovanja vrućih plinova, te trenja između vodećeg i centrirajućeg prstena i cijevi, dolazi do velikog mehaničkog i toplinskog opterećenja materijala.

Budući da rad obrađuje utjecaj pregrijavanja cijevi na stanje materijala cijevi, ispitivat će se samo toplinsko opterećenje. U slučaju nekontroliranog režima paljbe, cijev se može zagrijati i preko 1000 °C što ima vrlo negativne posljedice na stanje materijala. Dolazi do promjene metalografske strukture, mehaničkih svojstava materijala i promjene otpornosti na trošenje. Kako bi se spriječile, tj. smanjile ove promjene, potrebno je pravilno izabrati materijal cijevi u skladu s narinitim toplinskim opterećenjem, ali je i vrlo važno pravilno rukovanje prilikom paljbe.

U radu su opisane konstrukcijske značajke i namjena cijevi topničkog oružja, značajke procesa opaljenja, te su provedena ispitivanja mehaničkih svojstava i kemijskog sastava materijala cijevi nakon što je bio podvrgnut toplinskom opterećenju na različitim temperaturama, kakve se i ostvaruju prilikom paljbene uporabe oružja.

1. UVOD

Top je vrsta topničkog oružja koje je namijenjeno za uništavanje vertikalnih, brzopokretnih i točkastih ciljeva, oklopnih vozila, utvrđenih objekata, te za gađanje na velikim udaljenostima [1]. Ta definicija mogla bi se izreći sa strane vojnih teoretičara, ali sa strane tehničkih znanosti, top je toplinski stroj vrlo velike snage [2]. U ovom radu provedeno je ispitivanje utjecaja pregrijavanja cijevi topa 76 mm M42 na stanje materijala cijevi, pa će pažnja biti više usmjerena na sam top, a ostala topnička oružja bit će spomenuta. Karakteristike koje top čine različitim od haubica i minobacača su veća duljina cijevi, veća brzina projektila, rad sa većim tlakovima, te sam promjer tj. kalibar cijevi. Promjer cijevi ovisi o namjeni topa. Tako npr. protuavionski top ima „mali“ kalibar od 20 mm, čime je omogućena veća brzina paljbe i lakše manevriranje, a energija projektila je dovoljna da onemogući avion, dok teški topovi koji su namijenjeni za razaranje dobro utvrđenih ciljeva imaju velike kalibre do preko 150 mm. Top prema terminologiji spada pod klasično topničko oružje, gdje još pripadaju i haubice, top-haubice i minobacači, a odnos između njihovih putanja i dometa projektila prikazan je na slici 1.



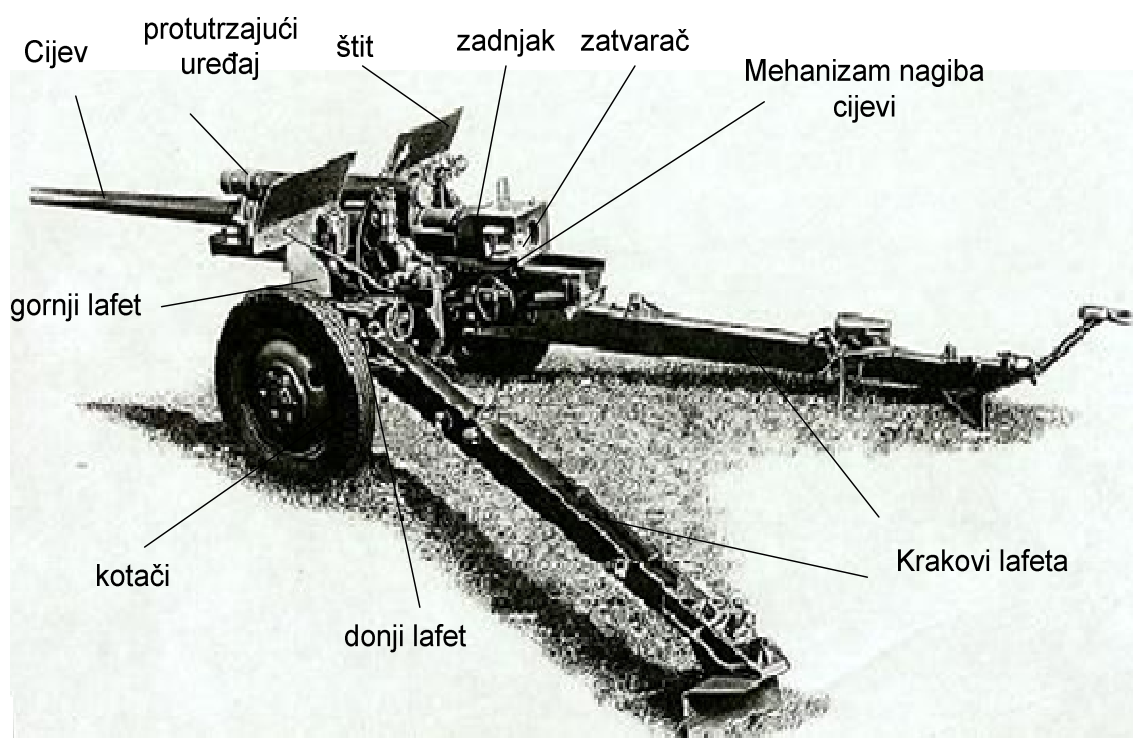
Slika 1. Putanje i dometi topničkih oružja [2]

Iz slike je vidljivo da je namjena topova za gađanje relativno slabo zaklonjenih ciljeva, dok su haubice i minobacači namijenjeni za zaklonjene ciljeve.

2. NAMJENA, KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE I MATERIJAL CIJEVI KLASIČNOG TOPNIČKOG ORUŽJA

2.1. NAMJENA CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA

Bez obzira na raznovrsnost pojedinih tipova topničkog oružja, za sve je karakteristično da sadrže sljedeće osnovne dijelove: cijev, protutrzajući uređaj, štit, zadnjak, zatvarač, mehanizam nagiba i pravca cijevi, kotače, donji i gornji lafet, te krakove lafeta. Osnovni dijelovi prikazani su na slici 2.



Slika 2. Glavni dijelovi topa 76 mm [3]

Od svih navedenih dijelova najvažniji dio topničkog oružja je cijev. Namjena cijevi je sljedeća:

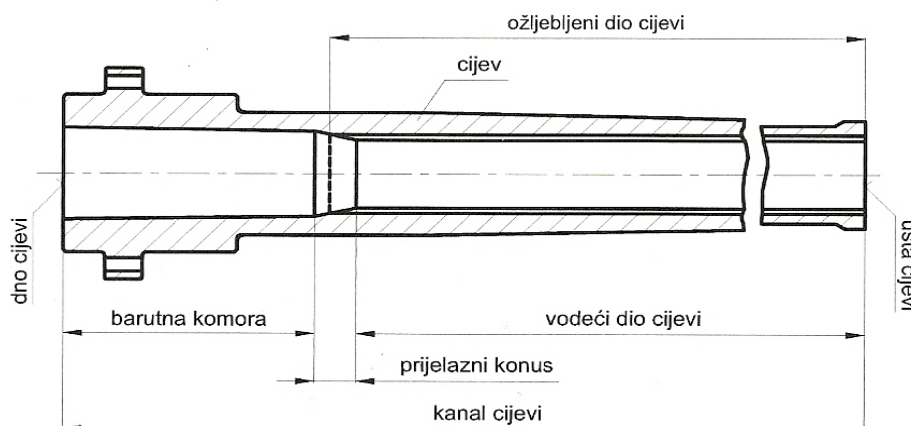
- * u cijevi se odvija proces opaljenja,
- * projektil dobiva početnu brzinu i rotaciju,
- * cijev usmjerava projektil prema cilju [4].

Obzirom da je cijev izložena vrlo visokim tlakovima, visokoj temperaturi, te trošenju zbog kretanja projektila, potrebno je obratiti pozornost na pravilnu konstrukciju kako nebi došlo do deformacije ili rasprsnuća cijevi. Po svom konstrukcijskom obliku, cijev klasičnih topničkih oružja je cijev debelih stijenki.

2.1.1. GLAVNI DIJELOVI CIJEVI

Dijelovi cijevi isti su kod svih klasičnih topničkih oružja, a razlikovati se može samo vodeći dio cijevi koji može biti gladak ili ožljebljen ovisno o izvedbi projektila. Glavni dijelovi su sljedeći (sl. 3.):

- barutna komora,
- prijelazni konus,
- vodeći dio (sl.3.).

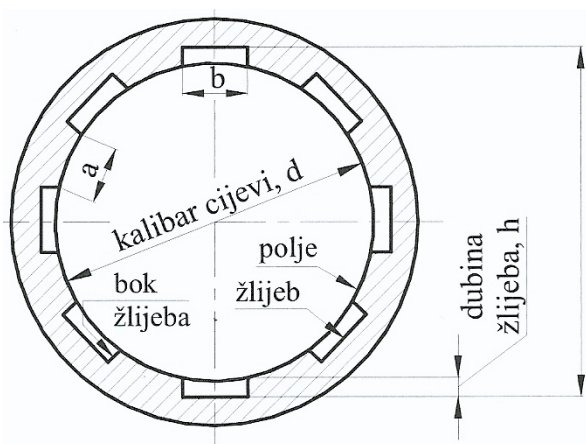


Slika 3. Glavni dijelovi cijevi [4]

Barutna komora je prostor u koji se smješta barutno punjenje. Punjenje može biti smješteno u čahuri ili stavljeno izravno u komoru. Sa gledišta balistike, nije bitno je li punjenje smješteno u čahuri ili nije, već da je volumen komore precizno definiran [5]. U njoj se odvija zapaljenje barutnog punjenja, stvaranje, a zatim i širenje barutnih plinova.

Prijelazni konus je dio između barutne komore i vodećeg dijela cijevi. Na njega se naslanja projektil vodećim prstenom, čime je omogućeno da projektil bude u koncentričnom položaju u odnosu na os kanala cijevi. Konus omogućava postepeno urezivanje vodećeg prstena u ožlijebljeni profil kanala cijevi. Kod ožlijebljenih cijevi konus je na prvoj trećini svoje duljine gladak, a zatim počinje urezivanje.

Vodeći dio je ožlijebljen u slučaju kada se koristi projektil s prstenovima, ili gladak kada projektil ima krilca za stabilizaciju u letu. Vodeći dio se nalazi između prijelaznog konusa i usta cijevi. Na poprečnom presjeku vodećeg dijela (sl. 4.) mogu se uočiti polja i žljebovi. Promjer između dva nasuprotna polja naziva se kalibar cijevi, s oznakom **d**. Broj žljebova često je razmjern kalibru i mora biti djeljiv sa 4 ili 8, što je uvjetovano brojem noževa na glavi alata za urezivanje žljebova [4].



Slika 4. Poprečni presjek cijevi [4]

Ukupna širina polja i žljeba najčešće iznosi $a+b=(8 \text{ do } 11) \text{ mm}$. Odnos ovih širina ovisi o početnoj brzini projektila, a kreće se u sljedećim granicama:

- * $1,5a < b < 3a$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila do 800 m/s
- * $a < b < 2a$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila veća od 800 m/s [4]

Dubina žlijeba h određuje se prema kalibru cijevi d i iznosi:

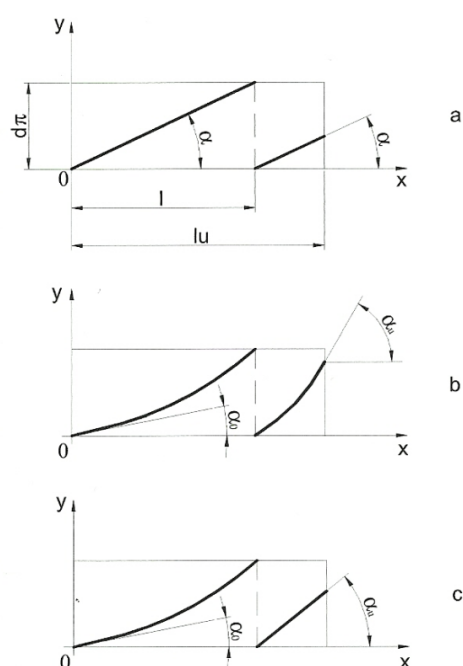
- * $h=(0,01 \text{ do } 0,015) \cdot d$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila do 800 m/s
- * $h=(0,015 \text{ do } 0,04) \cdot d$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila veća od 800 m/s[4].

Ako bi cijev izrezali po dužini, te cilindrični kanal razvili u x-y ravnini, dobili bi pravokutnik čija je ukupna duljina l_u jednaka duljini vodećeg dijela cijevi, a visina pravokutnika jednaka opsegu kalibra $d\pi$ (sl. 5.). Duljina l prikazuje apsolutnu duljinu jednog koraka žlijeba. Za pomak duljine l projektil se zakrene za puni krug oko svoje osi. Omjer duljine l i promjera d naziva se relativna duljina koraka žlijeba i označava se sa ε . Apsolutna duljina koraka žlijeba prikazana je jednadžbom:

$$l = d\pi / \tan \alpha \quad \text{iz čega slijedi da je:}$$

$$\varepsilon = l/d = \pi / \tan \alpha \text{ [4].}$$

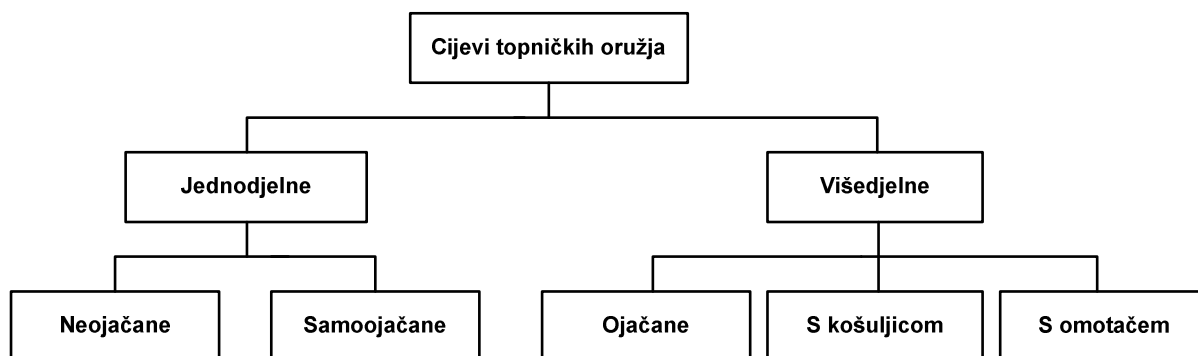
Iz navedene jednadžbe vidljivo je da relativna duljina koraka žlijeba ovisi samo o kutu uvijanja žlijeba α . Kut uvijanja α može biti konstantan, progresivan i kombiniran. On određuje brzinu rotacije projektila, a koliki će biti ovisi o potrebnoj brzini rotacije. Budući da rotacija utječe na stabilnost projektila, veći kutovi koristit će se kod kraćih cijevi i manjih početnih brzina, kao što je slučaj kod haubice, kako bi se osigurala potrebna stabilnost u letu.



Slika 5. Žlijeb cijevi razvijen u x-y ravnini, a) konstantan kut uvijanja, b) progresivan kut uvijanja, c) kombiniran kut uvijanja [4]

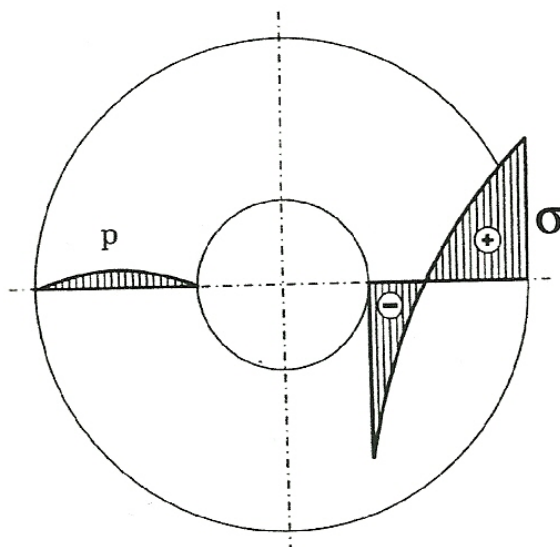
2.2. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE CIJEVI

Prema konstrukcijskom rješenju, cijev topničkog oružja može biti jednostjelna i višedjelna (sl. 6.):



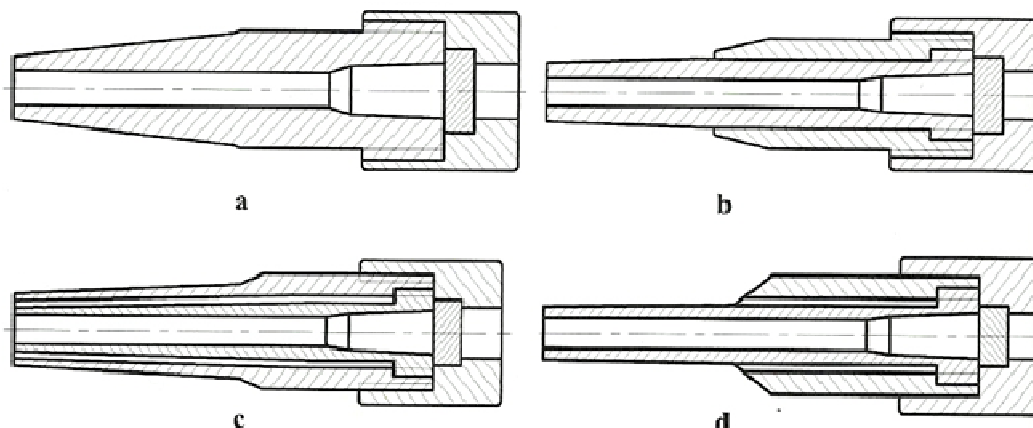
Slika 6. Podjela topničkih cijevi prema konstrukcijskom rješenju [4]

Jednodjelne cijevi- u većini slučajeva ojačavaju se postupkom samoojačavanja (autofretaže). Tim postupkom unutarnja stijenka cijevi izlaže se visokom (najčešće hidrauličkom) tlaku, pri čemu dolazi do plastične deformacije unutarnjih slojeva materijala cijevi. Kada bi se takva cijev ponovno izložila djelovanju tlaka, tj. ispaljivanju projektila, nove deformacije neće nastupiti sve dok je tlak barutnih plinova niži od tlaka autofretaže. Na slici 7. prikazana su zaostala naprezanja σ i tlak p koji djeluju pri mirovanju cijevi.



Slika 7. Raspodjela tlaka p i naprezanja σ na presjeku samoojačane cijevi
nakon rasterećenja [4]

Višedjelne cijevi- ojačavanje se vrši tako da se jedna ili više vanjskih cijevi u toplom stanju navlači preko unutarnje cijevi. Kad se cijevi ohlade, između njih se ostvaruje stezni spoj koji izaziva zaostala naprezanja u materijalu. Zaostala naprezanja suprotnog su predznaka u odnosu na naprezanja koja nastaju prilikom opaljenja, te se ona međusobno poništavaju, tj. umanjuju. Na slici 8. prikazane su prethodno navedene vrste ojačavanja topničkih cijevi.



Slika 8. Konstrukcijska rješenja cijevi topničkih oružja: a) jednodjelna cijev, b) dvodjelna ojačana cijev, c) cijev s košuljicom d) cijev s omotačem [4]

Svaka cijev, da bi se mogla koristiti kao dio topničkog oružja, mora ispuniti sljedeće zahtjeve:

- * nakon opaljenja uz ostvarivanje maksimalnog tlaka barutnih plinova i velikog udarnog opterećenja, ne smije doći do trajne deformacije cijevi;
- * progib cijevi uslijed vlastite težine mora biti u dopuštenim granicama;
- * proces opaljenja u cijevi mora se odvijati prema predviđenim parametrima unutarnje balistike;
- * cijev mora imati visoku otpornost na korozijsko i mehaničko trošenje;
- * održavanje cijevi mora biti jednostavno [4].

2.3. MATERIJAL CIJEVI

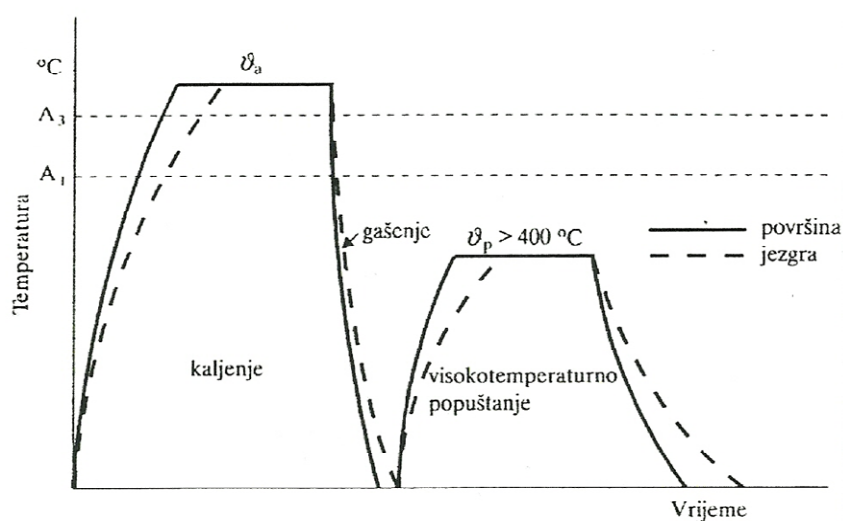
Topnička cijev je konstrukcijski dio koji je istodobno izložen vrlo visokom tlaku i temperaturi, stoga je prvi problem koji se javlja odabir materijala, a tek kasnije konstrukcija cijevi. Za topničke cijevi koriste se visokokvalitetni legirani čelici, a svojstva koja moraju posjedovati su:

- * visoka čvrstoća i granica tečenja;
- * dobra žilavost;
- * dovoljna tvrdoća i visoka otpornost na udarna opterećenja i trenje;
- * homogena struktura s malo nemetalnih uključaka;
- * visoka otpornost na kemijsko djelovanje produkata izgaranja baruta i na djelovanje atmosfere;
- * visoka udarna radnja loma [4].

Vrijednosti mehaničkih svojstava materijala za topničke cijevi kreću se u sljedećim granicama:

- * konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$930-1470 N/mm²;
- * vlačna čvrstoća R_m1030-1780 N/mm²;
- * istezljivost A8-20 %;
- * konačno suženje presjeka.....20-46 %
- * udarna radnja loma KU ≥ 36 J [4].

Kako se topovi primjenjuju u vanjskom okolišu, te cijev nije moguće zaštititi od ekstremnih uvjeta različitih podneblja, potrebno je odabrati materijal čija se svojstva ne mijenjaju s promjenom vanjske temperature ili da su promjene vrlo male. Visoke vanjske temperature nisu dovoljno visoke da bi utjecale na svojstva takvih materijala, ali niske temperature koje se mogu spustiti ispod -30 °C, mogu itekako utjecati na krhkost materijala i može doći do puknuća cijevi. Zbog takvih se okolnosti primjenjuju čelici za poboljšavanje čija se toplinska obrada sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja (sl. 9.). Primjeri takvih čelika su 30CrMoV9, 30CrNiMo8 i 30NiCrMo16. Čelici za poboljšavanje najčešće sadrže između 0,25 i 0,6% ugljika. Sadržaj ugljika u čeliku utječe na zakaljivost, a udio legirnih elemenata utječe na prokaljivost [4]. Zakaljivost je svojstvo čelika da se gašenjem s temperature austenitizacije postigne što veća tvrdoća na površini materijala. Prokaljivost je svojstvo čelika da poprimi što jednoličniju tvrdoću po poprečnom presjeku materijala [6].



Slika 9. Toplinska obrada čelika za topničku cijev [4]

Nakon kaljenja, čelik se visokotemperaturno popušta kako bi se materijalu vratila žilavost i duktilnost.

2.3.1. LEGIRNI ELEMENTI ČELIKA ZA IZRADU TOPNIČKIH CIJEVI

Legirni elementi poboljšavaju svojstva materijala cijevi u uvjetima intenzivnog toplinskog i mehaničkog opterećenja tijekom uporabe oružja.

Nikal- povećava čvrstoću i udarnu radnju loma, te omogućava dobru prokaljivost. Izrazito djelovanje ima na udarnu radnju loma pri niskim temperaturama.

Molibden- povećava čvrstoću na povišenim temperaturama i udarnu radnju loma. Poboljšava i prokaljivost, te olakšava strojnu obradu.

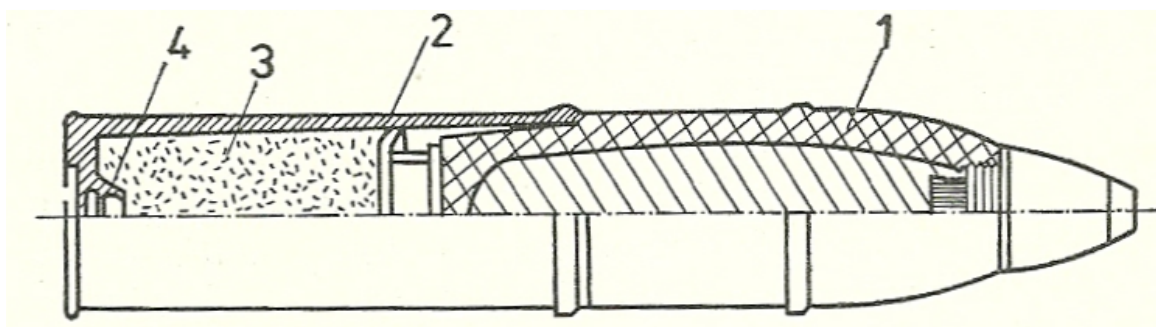
Krom- utječe na povećanje čvrstoće i prokaljivosti, i omogućava dobru otpornost prema atmosferskoj koroziji, kiselinama i vrućim plinovima

Vanadij- utječe na povećanje sitnozrnatosti, a time i žilavosti na sobnim i povišenim temperaturama.

3. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA TOPNIČKOG ORUŽJA

3.1. TOPNIČKI NABOJ

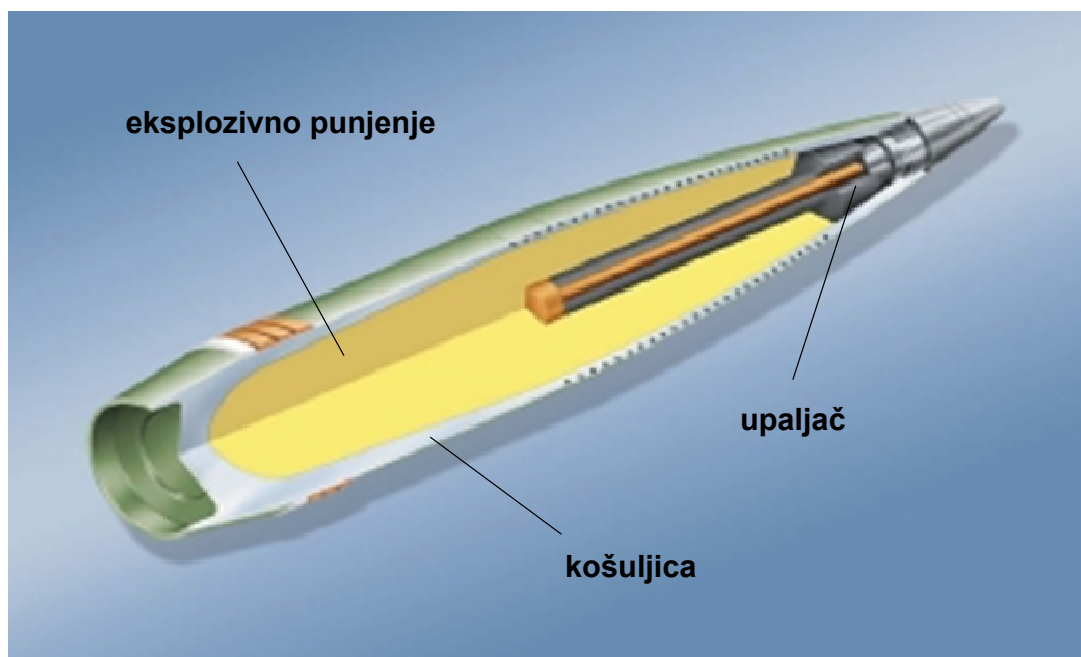
Kao što je prethodno navedeno, naboj može biti izveden kao projektil s barutnim punjenjem smještenim u čahuri ili izravno umetnutim u barutnu komoru. Punjenje u čahuri može biti slobodno nasipano ili smješteno u posebnu svilenu ili plastičnu vrećicu. Čahura se izrađuje od mjedi, čelika ili plastične mase na bazi celuloze. Glavni dijelovi topničkog naboja prikazani su na slici 10.



Slika 10. Topnički naboj [5]

1-projektil, 2-čahura, 3-barutno punjenje, 4-kapsula

Projektil je dio naboja kojim se ostvaruje željeni učinak na cilju. Košuljica projektila izrađuje se od čelika ili čeličnog lijeva, a u njoj je smješteno eksplozivno ili neko drugo punjenje, ovisno o potrebi. Na vrhu projektila smješten je upaljač, koji u trenutku udara stvara početni impuls čime se aktivira glavno punjenje (sl. 11.).



Slika 11. Presjek projektila topničkog oružja [6]

Ovisno o namjeni, postoje razorni i probojni projektili.

3.2. VRSTE BARUTA I NJIHOVE KARAKTERISTIKE

1.) CRNI BARUT- je mehanička smjesa salitre (kalij-nitrata), drvenog ugljena i sumpora. Salitra je važna kao nositelj kisika, koji je potreban za izgaranje ugljena i sumpora. Drveni ugljen ima ulogu goriva, a zahtjeva se da stvara što manje pepela, te da se lako melje. Sumpor ima dvostruko djelovanje kao vezivo i gorivo. Toplinska snaga crnog baruta iznosi oko 2740 kJ/kg, a temperatura izgaranja oko 2600 K. Pronalaskom bezdimnog (sivog) baruta, crni se počeo koristiti samo za pripale barutnih punjenja, izradu tempirnih smjesa i štapina, a sivi je preuzeo dotadašnju ulogu crnog baruta.

2.) BEZDIMNI BARUT- osnovne energetske komponente za izradu bezdimnog baruta su nitroceluloza, nitroglicerina, dinitrodiglikol i nitroguanidin. Postoji više vrsta sivih baruta koji su ime dobili po prethodno navedenim komponentama, a to su:

a) Nitrocelulozni barut- sastoji se od gotovo čiste nitroceluloze. Spada u grupu jednobaznih baruta. Najčešća primjena mu je kod streljačke i malokalibarske municije. Upotrebljava se kod topničkog oružja s kratkom cijevi, tj. haubica i minobacača.

b) Nitroglicerinski barut- sadrži dva aktivna sastojka, nitroglicerina i nitrocelulozu. Spada u grupu dvobaznih baruta. Postoje dvije vrste nitroglicerinskih baruta:

- * *Balistit* - sadrži oko 40% nitroglicerina, a time je i energetski najjači barut. Razvija količinu topline oko 5450 kJ/kg i temperaturu do 3800 K.
- * *Kordit* – sadrži oko 30% nitroglicerina, te razvija količinu topline oko 4190 kJ/kg.

c) Diglikolski barut- sastoji se od dvije aktivne komponente. Spada u grupu dvobaznih baruta, a pojavio se u toku II. svjetskog rata. Ima bolje osobine od nitroglicerinskih baruta, a razvijena toplinska energija iznosi oko 4190 kJ/kg.

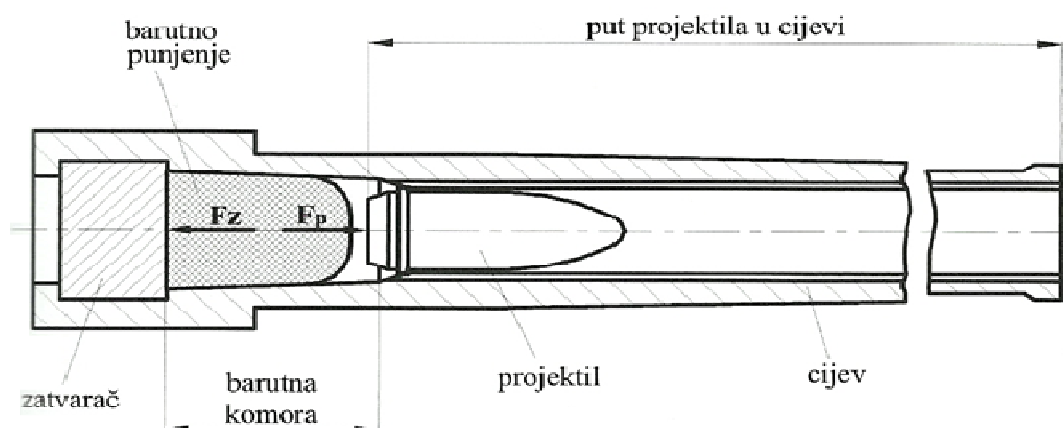
d) Nitrogvanidinski barut- sastoji se od tri aktivne komponente: nitroceluloze, nitroglicerina ili dinitrodiglikola i nitrogvanidina. Spada u grupu trobaznih baruta. Ako su sastavljeni bez nitroglicerina, nazivaju se još i bijeli baruti. Razvija količinu topline oko 3980 kJ/kg. Upotrebljava se kod topova srednjih i većih kalibara. U tablici 1. prikazane su neke karakteristične veličine spomenutih baruta za različite vrste oružja [5].

Tablica 1. Fizičko-kemijske i balističke karakteristike baruta [5]

Karakteristike Vrsta baruta	Razvijena količina topline Q, pri stalnom volumenu, [kJ/kg]	Temperatura izgaranja T, [K]	Energija baruta F, [J/kg]	Brzina izgaranja u_i [$\frac{dm}{s}$] [$10^5 Pa$]
Nitrocelulozni barut za streljačko oružje	3684-3768	2800-2900	10^6	$8 \cdot 10^{-6}$
Nitrocelulozni barut za topnička oružja	3266-3559	2700-2850	$9 \cdot 10^5$ do 10^6	$6,5 \cdot 10^{-6}$ do $7,5 \cdot 10^{-6}$
Nitroglicerinski barut za minobacače	4815-5024	3400-3500	$1,12 \cdot 10^6$ do $1,15 \cdot 10^6$	$11,6 \cdot 10^{-6}$ do $12 \cdot 10^{-6}$
Nitroglicerinski barut za topnička oružja	2512-2721	2300-2400	$8,5 \cdot 10^6$ do $9 \cdot 10^6$	$4 \cdot 10^{-6}$ do $4,5 \cdot 10^{-6}$

3.3. ZNAČAJKE PROCESA OPALJENJA

Opaljenje topničkog oružja predstavlja složen dinamički proces kod kojeg se kemijska energija baruta njegovim izgaranjem pretvara najprije u toplinsku energiju barutnih plinova, a zatim u kinetičku energiju projektila i pokretnih dijelova oružja. Proces opaljenja odvija se u sustavu koji čine cijev, projektil, barutno punjenje i zatvarač (sl. 12.).



Slika 12. Sustav cijev-projektil-barutno punjenje-zatvarač [4]

Nakon što udarna igla udari o kapsulu, zapaljuje se inicijalno punjenje, a time započinje proces opaljenja. Sljedeći korak je zapaljenje glavnog punjenja, te razvijanje velike količine vrelih barutnih plinova. Tlak plinova širi se jednako na sve strane komore, a kad savlada potrebnu silu za urezivanje žljebova u vodeći prsten, započinje kretanje projektila. Proces opaljenja traje oko jedne stotinke sekunde, pri čemu se okvirno postižu sljedeće balističke veličine:

- * najveći tlak barutnih plinova.....6000 bara;
- * najveća temperatura barutnih plinova.....3800 K;
- * najveća početna brzina projektila.....1800 m/s;
- * najveće ubrzanje projektila.....15 do 60 000 g/m/s²;
- * vrijeme kretanja projektila kroz cijev.....0,01 s [4].

Znanstvena disciplina koja se bavi proučavanjem procesa koji se odvijaju u cijevi za vrijeme opaljenja i kretanja projektila kroz cijev naziva se *unutarnja balistika*. U trenutku kada projektil napusti cijev, započinju procesi kojima se bavi disciplina pod nazivom *vanjska balistika*. Proces opaljenja sastavljen je od tri osnovna procesa:

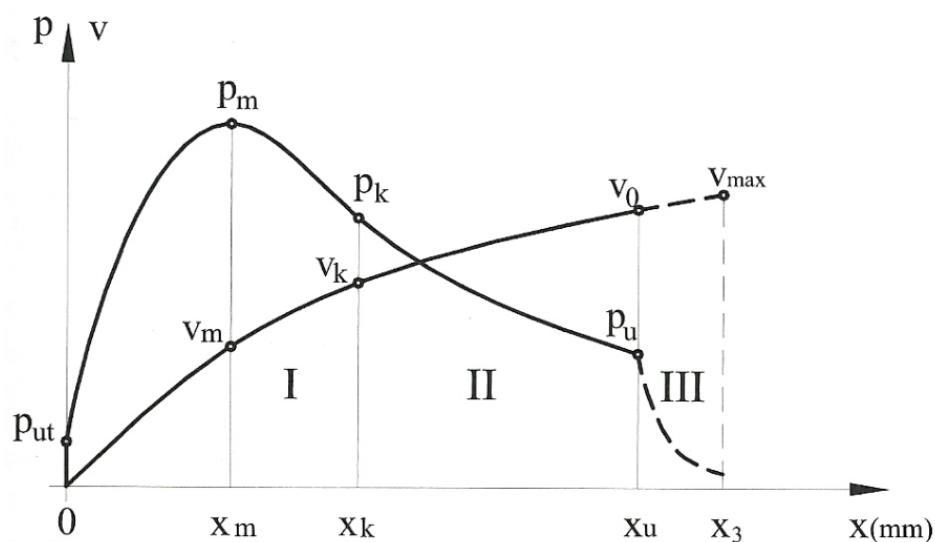
- * proces izgaranja baruta i stvaranja barutnih plinova vrlo visoke temperature i visokog tlaka;
- * proces pretvaranja toplinske energije barutnih plinova u kinetičku energiju kretanja sustava projektil-punjenje-cijev-lafet;
- * proces kretanja plinova, barutnog punjenja, projektila i cijevi [4].

Proces opaljenja može se podijeliti na nekoliko faza:

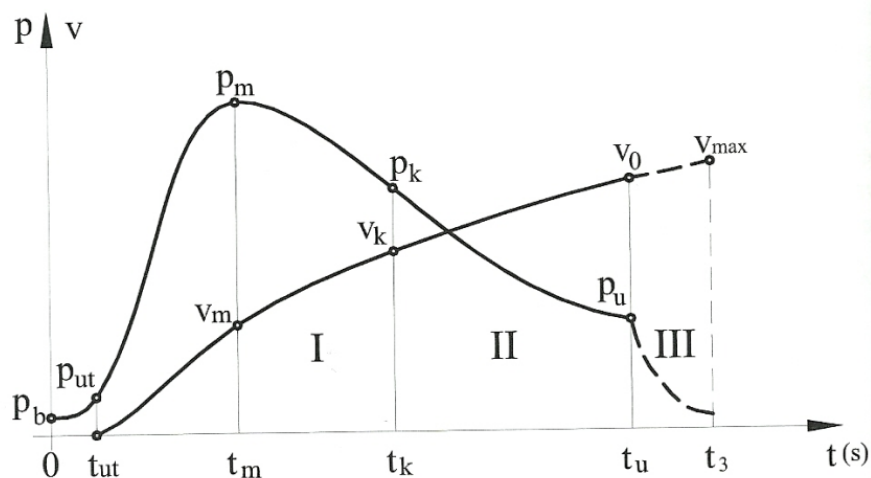
- * *prethodna faza*- traje od početka izgaranja barutnog punjenja do početka kretanja projektila;
- * *prva ili temeljna faza*- traje od početka kretanja projektila u cijevi do potpunog izgaranja barutnog punjenja;
- * *druga faza*- koja traje od završetka izgaranja barutnog punjenja do izlaska projektila iz cijevi;

- * *treća faza*- predstavlja razdoblje nakon djelovanja barutnih plinova na projektil i oružje, a traje od trenutka izlaska projektila iz cijevi do prestanka djelovanja barutnih plinova na projektil i cijev oružja [4].

Tijekom izgaranja barutnog punjenja, tlak p barutnih plinova i brzina kretanja projektila v mijenjaju se u ovisnosti od prijeđenog puta x projektila i vremena t kretanja profila. Zakonitosti ovih promjena prikazane su grafički na slikama 13. i 14.



Slika 13. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o prijeđenom putu x projektila [4]



Slika 14. Ovisnost tlaka barutnih plinova p i brzine v o vremenu kretanja projektila t [4]

U *prethodnoj fazi* procesa opaljenja udarni mehanizam pripaljuje barutno punjenje inicijalne kapsule. Barutni plinovi pripale zagrijavaju glavno punjenje na temperaturu zapaljenja. Tlak pripaljivanja označen je sa p_b na slici 14. Dok tlak ne dostigne vrijednost p_{ut} , izgaranje se odvija u konstantnom volumenu. Tlak p_{ut} naziva se tlakom utiskivanja projektila, a iznosi onoliko koliko je potrebno da se vodeći prsten utisne u žljebove cijevi, tj. između 250 i 500 bara, ovisno o kalibru cijevi.

U *prvoj fazi* počinje kretanje projektila kroz cijev. Na početku prve faze brzina projektila je relativno mala, pa se količina plinova povećava brže nego što se povećava prostor za njihovo širenje. Zbog toga tlak plinova raste i doseže maksimalnu vrijednost u trenutku tlaka p_m , tj. kada se izjednači brzina razvijanja plinova s brzinom povećanja njihovog volumena. Vrijednost tlaka p_m jedna je od temeljnih veličina unutarnje balistike, jer mora stvoriti određenu početnu brzinu projektila, a da pritom ne dođe do plastične deformacije cijevi.

Druga faza počinje po završetku izgaranja barutnog punjenja, tj. kada prestaje stvaranje novih plinova. Plinovi koji su stvoreni za vrijeme izgaranja imaju veliku unutarnju energiju koja se pretvara u rad kretanja projektila. U tom trenutku visina tlaka jednaka je tlaku p_k i pada do vrijednosti p_u na ustima cijevi. Na toj vrijednosti tlaka, brzina projektila jednaka je brzini v_0 i naziva početna brzina projektila, koja je ujedno i jedna od najznačajnijih veličina topničkog oružja.

Tréća faza procesa opaljenja počinje u trenutku kada projektil napusti cijev. Plinovi koji naglo izlaze iz cijevi još uvijek stvaraju potisak na dno projektila i ubrzavaju ga. Svoju maksimalnu brzinu projektil ima na udaljenosti x_3 ispred usta cijevi, i nakon toga brzina počinje opadati [4].

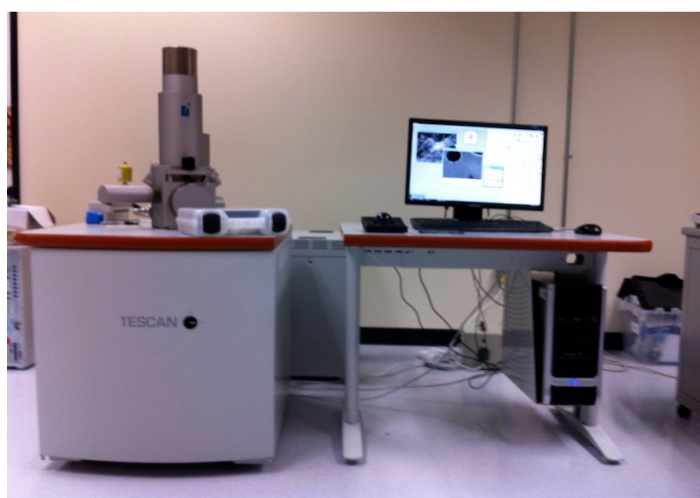
Na sve navedene veličine može se utjecati primjenom različitih barutnih punjenja. Toplinska energija barutnih plinova pretvara se u mehanički rad prema prvom zakonu termodinamike:

$$Q = U + \sum Li$$

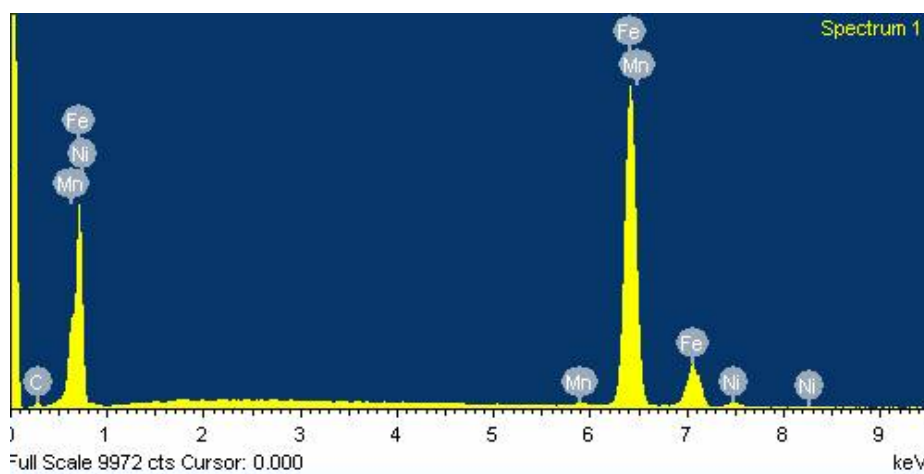
Ovaj zakon opisan riječima glasi: ukupna količina topline Q koja se dovede sustavu izgaranjem barutnog punjenja, jednaka je zbroju preostale energije barutnih plinova U i ukupno izvršenim vanjskim radovima $\sum L_i$ barutnih plinova. Odnos kinetičke energije projektila pretvorene u rad kretanja projektila i ukupne energije barutnih punjenja naziva se *stupanj korisnog djelovanja* η . Kod klasičnog topničkog oružja η doseže vrijednost $\eta=0,3$, što znači da samo 30% energije barutnih plinova utječe na ubrzanje projektila, a ostalo je gubitak.

4. KEMIJSKA ANALIZA UZORKA CIJEVI

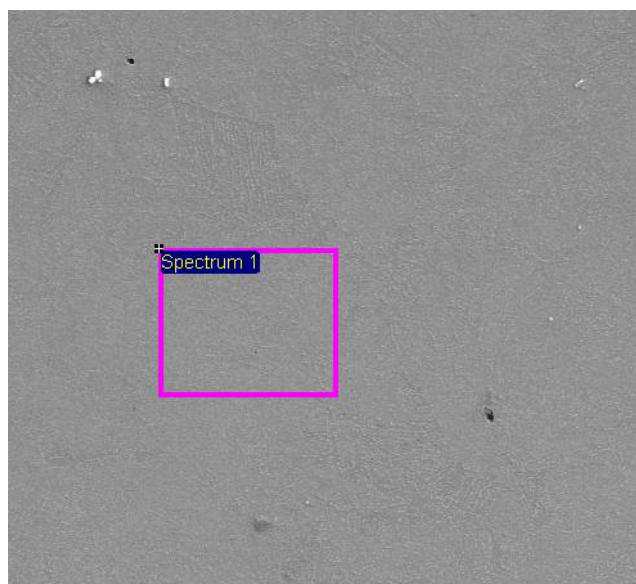
Kemijska analiza uzorka provedena je u laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kvalitativna analiza uzorka izvršena je na Skening-elektronskom mikroskopu tipa TESCAN VEGA (sl.15). Rezultati analize prikazani su na slici 16., a područje ispitivanja na površini uzorka prikazano je slikom 17.



Slika 15. Skening elektronski mikroskop tipa TESCAN VEGA [7]



Slika 16. Kvalitativna kemijska analiza uzorka dobivena pomoću SEM-a



Slika 17. Područje ispitivnja na površini uzorka

Iz ove analize vidljivo je da uzorak sadrži veće količine Mn i Ni, te željeza kao nosioca i manje količine C. Budući da ovom metodom možemo samo kvalitativno odrediti udio pojedinog konstituenta, te iz tih podataka ne možemo odrediti o kojem se čeliku radi, izvršena je i analiza spektrometrijskom metodom na uređaju SPECTROMETAR GDS 850 A (sl.18.), proizvođača Leco, a dobiveni rezultati prikazani su u tablici 2.



Slika 18. Spektrometar GDS 850 A proizvođača Leco [8]

Tablica 2. Rezultati kvantitativne kemijske analize uzorka

oznaka uzorka	%									
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
X	0,31	0,20	0,60	0,021	0,053	0,06	2,28	0,004	0,10	ostatak

Iz kvantitativne analize utvrđena je dosta rijetka kombinacija legirnih elemenata. Glavni legirni element je nikal, dok silicija, ugljika, bakra i mangana ima u manjem postotku. Kroma i molibdena ima ili u vrlo malom postotku ili ga uopće nema, a kao štetne primjese javljaju se sumpor i fosfor također u malom postotku. Prema ovim podacima utvrđeno je da bi ovaj čelik mogao odgovarati čeliku oznaka 30 N 8 po francuskom standardu AFNOR NF, te ga nije moguće povezati s bilo kojim čelikom po DIN-u, JUS-u ili europskoj normi. Mogući razlog tako rijetkog primjera legiranja materijala je što je top ruski, a time i podudarnost normi dolazi u pitanje. Razlog što ima puno nikla opet bi mogla biti Rusija, zato što nikal ima izrazito djelovanje na udarnu radnju loma pri niskim temperaturama, a Rusija je poznata po vrlo niskim temperaturama.

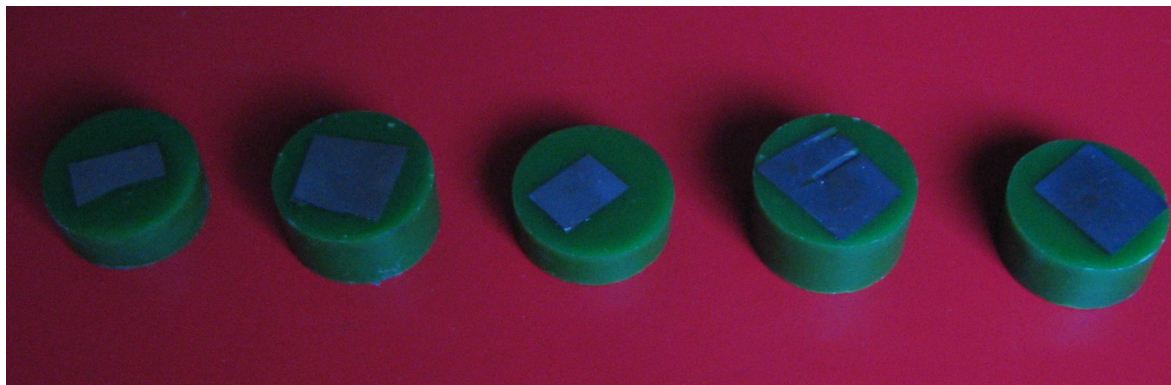
5. PRIPREMA UZORAKA ZA METALOGRAFSKO SNIMANJE

Iz cijevi topa 76mm M42 izrezano je 6 uzoraka. Prilikom rezanja, uzorke se hladilo kako ne bi došlo do promjene mikrostrukture. Jedan uzorak nije bio zagrijavan, a ostali su bili redom zagrijavani od 600° do 1000° C tijekom jednog sata, te su hlađeni na zraku. Tim postupkom oponašan je stvaran proces koji se odvija u cijevi prilikom opaljenja, pa sve do potpunog ohlađivanja cijevi, u uvjetima intenzivnog režima opaljivanja. Naravno, u stvarnosti cijev ne mora biti hlađena na zraku, budući da za vrijeme paljbe može padati kiša, snijeg ili biti velik postotak vlage u zraku, čime je hlađenje uvelike ubrzano. Nakon što su uzorci bili podvrgnuti toplinskom opterećenju i ohlađeni, stavljani su u kalup, te zaliveni smjesom tekućine i polimernog praha. Na taj način uzorci su dobili uniformni oblik kojim je lakše rukovati. Nakon što su zaliveni, uzorci se bruse kako bi se odstranili neželjeni slojevi (nečistoća, masti, oksidacija) i kako bi se površina uzoraka poravnala s površinom mase u koju su zaliveni. Predzadnji postupak pripreme je poliranje, čime se dobije još finije obrađena površina, a time i kvalitetnija analiza. Završni postupak pripreme je nagrivanje. Površina se nagrivala NITALOM (otopina dušične kiseline u alkoholu) što je standardni postupak za čelike. Metalografsko snimanje izvršeno je na svjetlosnom mikroskopu tipa OLYMPUS BH-2 (sl. 19.).



Slika 19. Svjetlosni mikroskop tipa OLYMPUS BH-2 [9]

Uzorci koji su ispitivani prikazani su na slici 20.



Slika 20. Ispitni uzorci zaliveni u polimernu masu

Nakon što se svaki uzorak zasebno snimi, može se krenuti sa analizom mikrostrukture. Mikrostruktura se može odrediti usporedbom već gotovih metalografskih snimaka iz različitih literatura ili iskustvom, a ako to nije moguće, mjeri se tvrdoća pojedinog uzorka ili mikrotvrdoća pojedinog konstituenta, te se na temelju toga dolazi do zaključka.

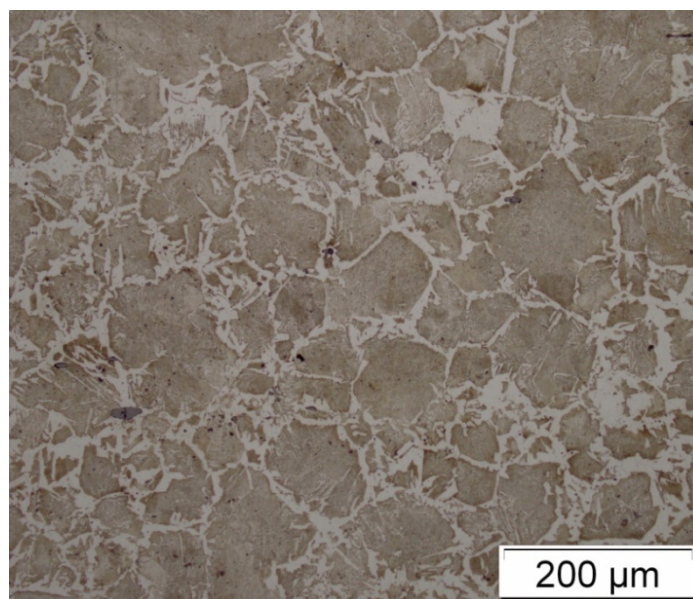
6. ANALIZA MIKROSTRUKTURE

Kako je prethodno navedeno analiza je vršena na svjetlosnom mikroskopu. Na temelju metalografskih snimki nije bilo moguće dati jasan zaključak o mikrostrukturi pa je rađena dodatna analiza, tj. mjerenje tvrdoće uzoraka. Mjerena je tvrdoća HV0,2 po poprečnom presjeku uzoraka, a rezultati su prikazani u tablici 3.

Tablica 3. Rezultati mjerenja tvrdoće HV0,2

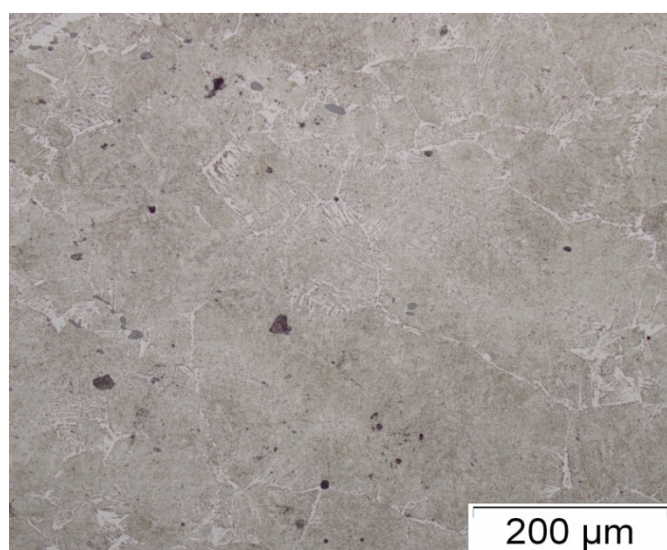
	Tvrdoća HV0,2					
Br. uzorka Br. mjerenja	1	2	3	4	5	6
1	209	244	210	176	188	202
2	205	237	183	155	165	196
3	214	252	207	159	220	196
4	208	220	213	148	193	207
5	207	167	237	151	223	233
Aritmetička sredina	209	226	225	194	218	224

Uzorak pod brojem 1 nije bio prethodno zagrijavan, a njegova metalografska snimka prikazana je na slici 21. Na slici je vidljiva feritno-perlitna struktura. Tamnija zrna prikazuju perlit, dok su svjetlija ferit. Ferit je većinom izlučen po granicama prethodno austenitnog zrna, dok je na nekim mjestima izlučen u obliku zrna. Prosječna tvrdoća od 209 HV0,2 odgovara tvrdoći perlita.



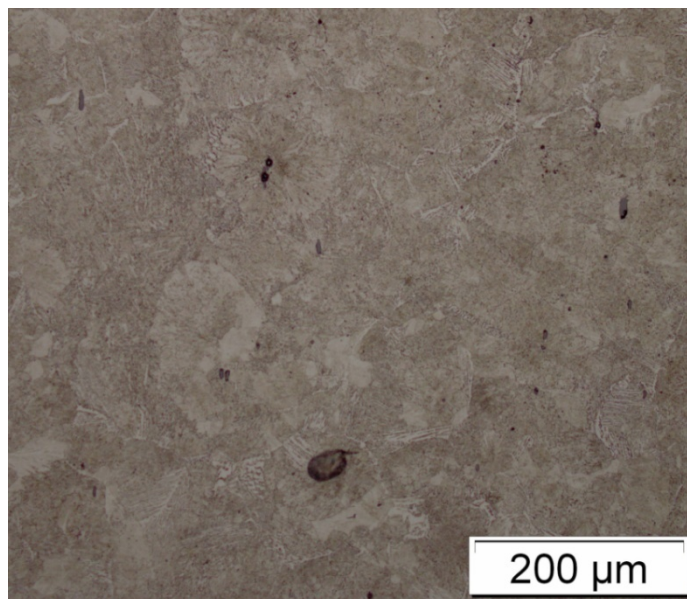
Slika 21. Metalografska snimka nezagrijavanog uzorka

Uzorak 2 zagrijavan je na temperaturu 600°C, te hlađen na zraku. Takav postupak koji se sastoji od zagrijavanja čelika na temperaturu od 450° do 600°C i hlađenja na zraku naziva se žarenje za redukciju zaostalih naprezanja, a koristi se kada je čelik bio izložen plastičnoj deformaciji u svrhu snižavanja zaostalih naprezanja. Metalografska snimka prikazana je na slici 22., na kojoj je ponovo vidljiva feritno-perlitna struktura. Kod ovog uzorka ferit je malo manje izlučen po granicama perlita, dok je više izlučen u obliku iglica po cijelom uzorku. Tvrdća od 226 HV0,2 također odgovara tvrdoći perlita.



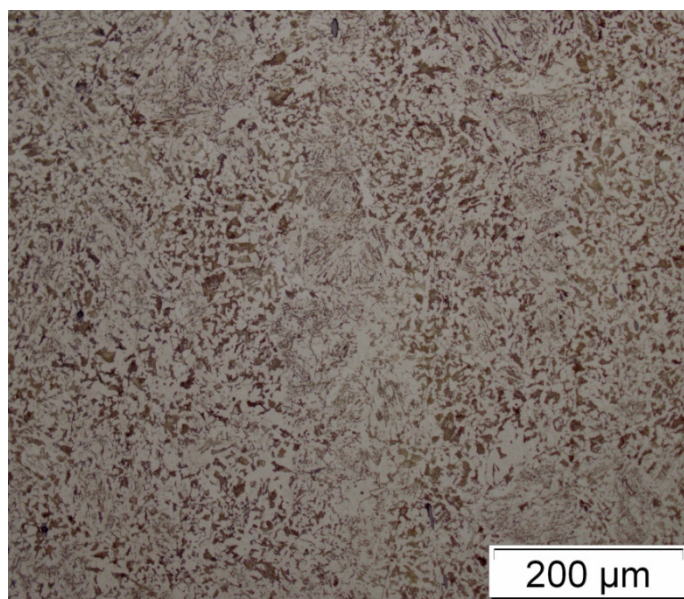
Slika 22. Snimka uzorka zagrijavanog na 600°C, te hlađenog na zraku

Metalografska snimka uzorka 3 prikazana je na slici 23.. Taj je uzorak bio zagrijavan na temperaturu od 700°, te hlađen na zraku. Vidljivo je da je ferit sve slabije izlučen po granicama zrna perlita. Na nekim mjestima još je u obliku iglica, dok se polagano počinje formirati u obliku poligonalnog zrna. Tvrdća od 225 HV_{0,2} odgovara tvrdoći prošlog uzorka, a tome ide u prilog da su metalografske snimke uzorka 2 i 3 dosta slične.



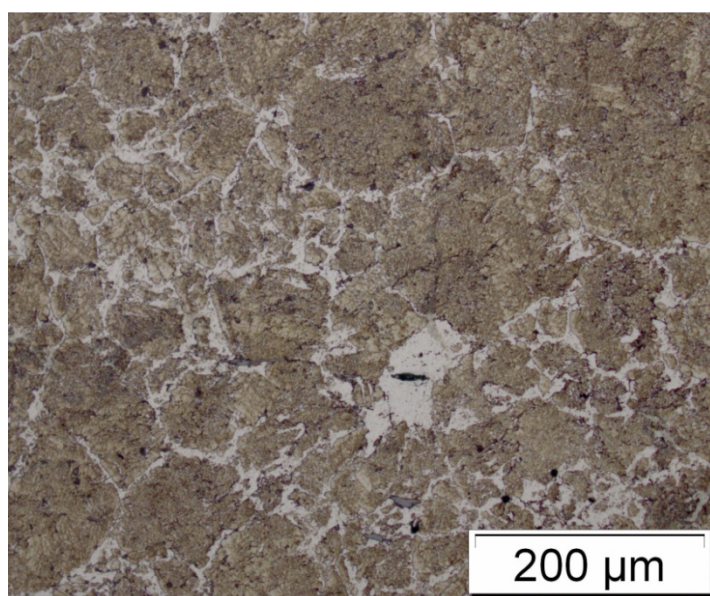
Slika 23. Snimka uzorka zagrijavanog na 700°C, te hlađenog na zraku

Na slici broj 24. prikazana je snimka uzorka zagrijavanog na 800°C. Na ovoj snimci vidljiva je velika promjena mikrostrukture za razliku od prve dvije. Struktura je i dalje feritno-perlitna, ali je udio faza zamijenjen. Ferit je sada u potpunosti izlučen u obliku poligonalnog zrna, a i udio mu se znatno povećao. Tvrdća je pala za otprilike 30 HV, i sada prosječna vrijednost iznosi 194 HV_{0,2}. Razlog tome je što u strukturi ima puno ferita, a tvrdoća ferita iznosi oko 100 HV. Ova promjena ima negativne posljedice ne samo zbog pada tvrdoće, što uzrokuje veće trošenje cijevi, već i zbog toga što ferit uzrokuje pad žilavosti materijala.



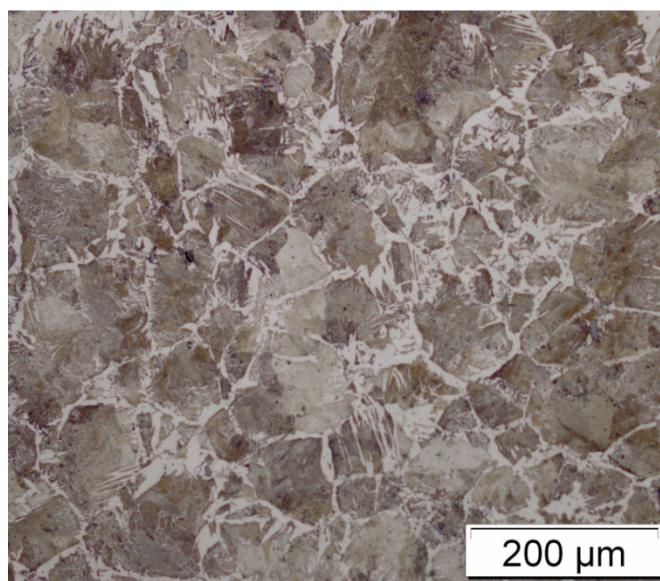
Slika 24. Snimka uzorka zagrijavanog na 800°C, te hlađenog na zraku

Sljedeći uzorak pod brojem 5 (sl. 25.) bio je zagrijavan na temperaturu od 900°C, te hlađen na zraku. Mikrostruktura opet počinje nalikovati na početno stanje, tj. kada uzorak nije bio zagrijavan. Udio perlita se ponovo povećao, a ferit se počinje formirati po granicama zrna. Tvrdća se povećala na 218 HV_{0,2} što ponovo odgovara tvrdoći perlita. Ovakvo stanje mikrostrukture je povoljnije od prošloga stanja.



Slika 25. Snimka uzorka zagrijavanog na 900°C, te hlađenog na zraku

Posljednji uzorak pod brojem 6 (sl.26.) zagrijavan je na 1000°C, te hlađen na zraku. Takav postupak koji se sastoji od zagrijavanja čelika na temperaturu između 950° i 1100°C, te dugotrajnog hlađenja naziva se žarenje na grubo zrno, a primjenjuje se kada se čelik obrađuje odvajanjem čestica. Ovakva struktura je najbližnja početnoj strukturi gdje je ferit većinom izlučen po granicama perlitnog zrna. Prosječna tvrdoća je 224 HV0,2, što opet govori da nije došlo do znatnije promjene mikrostrukture, te da prevladava perlit.



Slika 26. Snimka uzorka zagrijavanog na 1000°C, te hlađenog na zraku

Temeljni pokazatelj promjena mehaničkih svojstava je mikrostruktura materijala. Iz podataka dobivenih analizom može se zaključiti sljedeće:

- * kritična temperatura pregrijavanja je 800°C, zato što dolazi do značajnijeg pada tvrdoće,
- * nije došlo do značajnije promjene mikrostrukture,
- * struktura je perlitno-feritna, što znači da su sve krivulje ohlađivanja bile iznad, donje kritične krivulje ohlađivanja,
- * nema velikih promjena u tvrdoći materijala.

Analiza mikrostrukture rađena je na temelju tvrdoća uzoraka, te na temelju podataka iz knjige „*Metallography and microstructures 2004*“ [10], koju je objavila ASM international, organizacija američkih znanstvenika i inženjera koji se bave analizom metala.

7. ZAKLJUČAK

Pregrijavanje cijevi topničkog oružja utječe na promjenu stanja materijala cijevi. Takva promjena ovisna je o vrsti korištenog materijala, tj. o kemijskom sastavu i mikrostrukturi materijala. Čelik koji je ispitivan ne pokazuje veće promjene u strukturi, a razlog tome je što početna mikrostruktura ne sadrži niti malo martenzita, kod kojeg bi prilikom hlađenja na zraku došlo do značajnije promjene tvrdoće. Moglo bi se reći da je ovaj čelik „otporan“ na pregrijavanje cijevi, s obzirom na temperature na kojima je ispitivan.

Budući da je top predviđen da izdrži velik broj opaljenja i puno godina u radu, ovakve male promjene ne treba zanemariti, jer i one mogu donijeti veliku štetu. Kako bi se to spriječilo, potrebno je, kako je već prije navedeno pridržavati se režima paljbe. Posebnu pažnju treba posvetiti ako su prilikom paljbe prisutne oborine, jer bi u tom slučaju krivulja hlađenja mogla biti ispod podkritične, te bi došlo do zakaljivanja cijevi. U tom slučaju trebalo bi materijal cijevi popustiti, kako bi se vratila žilavost cijevi. Nakon svakog većeg broja opaljivanja, potrebno je provjeravati stanje cijevi, kako bi se produžio balistički vijek trajanja topovske cijevi i održavala paljbena učinkovitost topničkog oružja.

LITERATURA

- [1] *Opća enciklopedija*, Jugoslavenski leksigografski zavod, Zagreb, 1982
- [2] M. Jakopčić, *Osnove topničkog naoružanja*, Skripta, Zagreb, 1996
- [3] <http://www.100thww2.org/support/824/824T76mm.html>
- [4] M. Jakopčić, *Otpornost na trošenje cijevi topničkih oružja*, Disertacija, Zagreb, 2002
- [5] L. Bekavac, I. Čirić, *Balistika*, Vojno-izdavački zavod, Beograd, 1979
- [6] <http://www.google.hr/imgresimgurl=httpwww.engineerdir.com>
- [7] http://www.technicalsalessolutions.com/item_description.php?IID=235
- [8] <http://lecoitaly.com/appareil.php?page=spectrog>
- [9] <http://www.labx.com/v2/spiderdealer2/vistasearchdetails.cfm?LVid=17075072>
- [10] *Metallography and microstructures 2004*, ASM international, 2004